

19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 44 18 050 A 1

21 Aktenzeichen: P 44 18 050.0
22 Anmeldetag: 24. 5. 94
43 Offenlegungstag: 5. 1. 95

61 Int. Cl. 6:
H 01 B 12/02
H 01 B 12/12
C 04 B 35/50
C 04 B 35/00
H 01 F 6/06
H 01 F 36/00
H 02 H 9/02

DE 44 18 050 A 1

30 Innere Priorität: 32 33 31

04.06.93 DE 43 18 562.2

71 Anmelder:

ABB Research Ltd., Zürich, CH

74 Vertreter:

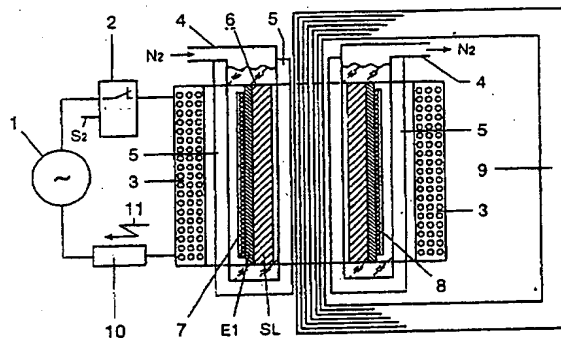
Rupprecht, K., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 61476 Kronberg

72 Erfinder:

Paul, Willi, Dr., Wettingen, CH; Meier, Jürg, Stein
am Rhein, CH

54 Hohlzylindrischer Hochtemperatursupraleiter und dessen Verwendung

57 Bei Hochtemperatursupraleitern (6), die als induktive Strombegrenzer eingesetzt werden, besteht ohne besondere Vorsichtsmaßnahme die Gefahr, das Kurzschlußströme zu lokalen Spannungsüberhöhungen und Aufheizungen bzw. zur lokalen Zerstörung des Hochtemperatursupraleiters führen können. Um dies zu vermeiden, wird ein Hohlzylinder (SL) des Hochtemperatursupraleiters (6) mit einer 1 µm dicken Leitsilberschicht (E1) überzogen. Darauf kann eine 2-10 µm dicke Metallschicht oder -folie aus Silber oder Aluminium aufgebracht sein. Um Zugspannungen in der Keramik des Hohlzylinders (SL) aus einem Hochtemperatursupraleiter zu verringern oder zu vermeiden und den elektrischen Übergangswiderstand der Metallschichten zu verringern, wird dieser Hohlzylinder (SL) bei Zimmertemperatur unter einer Zugspannung mit einer mechanischen Armierung (7) aus einem elastischen Stahldraht umwickelt. Anschließend wird diese Armierung (7) durch ein Lot oder einen klebstoffhaltigen Kunstharz (8) fixiert, so daß eine Armierungs-Zugspannung bzw. ein kompressiver Druck auf den Hohlzylinder (SL) auch bei Temperaturen unterhalb 100 K bestehen bleibt.



DE 44 18 050 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 11. 94 408 061/476

9/34

Beschreibung

Bei der Erfindung wird ausgegangen von einem Hochtemperatursupraleiter nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1. Die Erfindung betrifft auch eine Verwendung des Hochtemperatursupraleiters.

STAND DER TECHNIK

Mit dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 nimmt die Erfindung auf einen Stand der Technik Bezug, wie er aus der DE-A1-41 24 980 bekannt ist. Bei dem dort angegebenen hohlzylindrischen, stabilisierten keramischen Hochtemperatursupraleiter sind innerhalb des Hochtemperatursupraleiters in gutem elektrischem Kontakt mit diesem und parallel zu dessen Längsachse Edelmetallstäbe bzw. -leiter vorgesehen. Der Hohlzylinder ist an seinen Enden mit 2 Kontaktstücken aus Silberblech versehen, welche über die elektrischen Edelmetalleiter miteinander verbunden sind.

Aus der US-A-5,140,290 ist eine Vorrichtung zur induktiven Strombegrenzung eines Wechselstromes bekannt, bei welcher der zu begrenzende Strom durch eine Induktionsspule fließt. Im Inneren dieser Spule ist ein Hohlzylinder aus einem Hochtemperatursupraleiter angeordnet und konzentrisch darin ein weichmagnetischer Werkstoff hoher Permeabilität. Bei Normalbetrieb bzw. Nennstrom schirmt die Supraleitfähigkeit des Hohlzylinders dessen Innenraum ab, so daß die Impedanz der Induktionsspule sehr gering ist. Bei einem Überstrom z. B. durch einen Netzkurzschluß verschwindet die Supraleitfähigkeit, und die Impedanz der Induktionsspule erreicht ihren maximalen, strombegrenzenden Wert.

Diese Spannungs- und Strombelastungen bei kurzzeitigen Überströmen oberhalb des kritischen Stromes und mit elektrischen Spannungen von einigen mV/cm bis V/cm führen zu sogenannten heißen Stellen. Durch kleine Inhomogenitäten im Werkstoff des Hochtemperatursupraleiters kommt es zu lokalen Überhöhungen der elektrischen Spannung. Diese führen zu einer verstärkten Energiedissipation und damit zu einer Aufwärmung an dieser Stelle. Die Folge ist eine zunehmende lokale Überhöhung des Widerstandes und damit des Spannungsabfalls. Bei längerer Belastung führt dieser Effekt zur lokalen Zerstörung des Hochtemperatursupraleiters.

Aus der DE-A1-40 19 368 ist ein Verfahren zur Herstellung von Zylindern bzw. Ringen eines Hochtemperatursupraleiters auf der Basis eines Wismut-2-Schichtkuprates bekannt. Hierbei wird die homogene Schmelze in eine rotierende, kalte Schmelzform eingeschleudert. Durch sehr unterschiedliche Erstarrungsgeschwindigkeiten am Rand und im Probeninneren entsteht ein Gefüge mit recht unterschiedlicher Dichte und voller innerer Spannungen.

Die Anfälligkeit derartiger Hochtemperatursupraleiter, wie sie z. B. zur Abschirmung elektromagnetischer Felder bei Temperaturen unter 100 K oder als induktive Strombegrenzer eingesetzt werden, liegt in der fehlenden plastischen Verformbarkeit der Keramik begründet. An kleinsten Mikrorissen entstehen bei Zugbelastung Spannungsspitzen, die plastisch nicht abgebaut werden und zum Wachsen der Risse führen. Die Ursache der mechanischen Zugspannungen sind z. B. elektromagnetische Kräfte oder Temperaturgradienten.

Zum einschlägigen Stand der Technik wird zusätzlich auf die DE-A-17 65 109 verwiesen, aus der ein stabili-

sierter Wechselstromsupraleiter bekannt ist, bei dem auf einen hohlzylindrischen Träger aus Kupfer oder Aluminium in gutem elektrischem Kontakt ein konventioneller Typ-III-Supraleiter z. B. aus Technetium oder Niobium/Zirkonium und darauf eine Schicht aus einem Supraleiter des Typs I oder II aus Blei oder Niobium in einer Dicke von jeweils 1 µm—10 µm angeordnet ist, z. B. durch Dissoziation, Elektrolyse oder Plasmaabscheidung.

Für keramische Hochtemperatursupraleiter sind zur elektrischen Stabilisierung speziell dimensionierte Metallschichten erforderlich. Dabei ist die elektrische Kontaktierung problematisch.

Aus der DE-A1-39 19 465 ist eine strombegrenzende Drosselspule mit einer stromdurchflossenen Wicklung und mit einem hohlzylindrischen, supraleitenden Kern aus einem metalloxidkeramischen Supraleiter bekannt, der bei Überschreitung einer Stromschwelle in der Wicklung magnetisch in den normalleitenden Zustand versetzt wird. Der Hohlraum des supraleitenden Kerns ist wenigstens zum Teil mit einem ferromagnetischen Material ausgefüllt, welches abwechselnd aus supraleitfähigem und ferromagnetischem Material zusammengesetzt und vom supraleitenden Kern thermisch isoliert sein kann.

Auch hier können durch kleine Inhomogenitäten im Supraleiter bei Überströmen lokale Überhitzungen eintreten.

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Die Erfindung, wie sie im Patentanspruch 1 definiert ist, löst die Aufgabe, einen Hochtemperatursupraleiter der eingangs genannten Art anzugeben, bei dem lokale Spannungsüberhöhungen und damit lokale Überhitzungen des Hochtemperatursupraleiters vermieden werden. Eine Verwendung ist im Anspruch 10 definiert.

Ein Vorteil der Erfindung besteht darin, daß die Strom- und Spannungsbelastbarkeit von Hochtemperatursupraleitern wesentlich erhöht wird. Der Supraleiter kann mit einem Vielfachen des kritischen Stromes belastet werden, wie das für Strombegrenzeranwendungen notwendig ist.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 einen Wechselstromkreis mit einem Kurzschlußstrombegrenzer, der zur Strombegrenzung im Inneren einer Drosselspule einen hohlzylindrischen Hochtemperatursupraleiter mit weichmagnetischem Kern aufweist,

Fig. 2 einen Kurzschlußstrombegrenzer gemäß Fig. 1 mit einer Drosselspule im Innenraum des Hochtemperatursupraleiters und

Fig. 3 einen metallisch beschichteten Hochtemperatursupraleiter im Querschnitt.

WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

Gemäß Fig. 1 ist eine Wechselstromquelle (1), z. B. ein Generator oder Transformator, über einen Öffner bzw. Schalter (2) und eine Drosselspule (3) mit einem Stromverbraucher bzw. einer elektrischen Last (10) in Reihe geschaltet. Im Innenraum der Drosselspule (3) befindet sich innerhalb eines mit flüssigem Stickstoff (N₂) zumindest teilweise gefüllten Kühlers (4) mit einem Vakuum-

gefäß (5) ein hohlzylindrischer Hochtemperatursupraleiter (6), der aus mehreren kurzen Zylindern zusammengesetzt sein kann, und der bei Normalbetrieb des Stromverbrauchers (10) supraleitend ist. Im Innenraum des Hohlzylinders des Hochtemperatursupraleiters (6) ist ein Kern aus einem weichmagnetischen Werkstoff, vorzugsweise ein Transformator Kern (9) angeordnet, dessen Induktivität durch den supraleitenden Hochtemperatursupraleiter (6) gegenüber der Drosselspule (3) abgeschirmt wird. Es ist natürlich auch möglich, die Drosselspule (3) oder den Transformator Kern (9) oder auch beide ebenfalls mit flüssigem Stickstoff zu kühlen, d. h., innerhalb des Vakuumpfäßes (5) anzuordnen.

Im Falle eines durch einen Pfeil angedeuteten Kurzschlusses (11) im Stromverbraucher (10) wird durch einen erhöhten Stromfluß durch die Drosselspule (3) die kritische Stromstärke des Hochtemperatursupraleiters (6) überschritten, so daß der Hochtemperatursupraleiter (6) normalleitend wird, die Induktivität des Transformator Kerns (9) zur Wirkung kommt und den Kurzschlußstrom durch die Drosselspule (3) auf einen unkritischen Wert begrenzt. Danach kann der Öffner (2) durch ein Abschaltsignal (S2) geöffnet und der Kurzschlußstrom ganz abgeschaltet werden.

Auf einem Hohlzylinder (SL) des Hochtemperatursupraleiters (6) ist als elektrische Armierung eine 1. Metallschicht bzw. Silberschicht (E1) aus einer Leitsilberpaste aufgebracht und darauf unter Zugspannung eine mechanische Armierung (7) aus Stahldraht oder aus einem Band oder aus einer Faser oder aus Glasfasergewebe gewickelt, die mit einem Fixiermittel (8) fixiert ist.

Fig. 2 zeigt im Unterschied zu Fig. 1 eine Drosselspule (3) innerhalb des Hohlraumes des Hochtemperatursupraleiters (6), wobei ein Schenkel des Transformator Kerns (9) innerhalb des Hohlraumes der Drosselspule (3) angeordnet ist. Auch bei dieser Anordnung wird der Hochtemperatursupraleiter (6) durch einen Kurzschlußstrom normalleitend und erhöht damit die Impedanz der Vorrichtung aus Drosselspule (3), Hochtemperatursupraleiter (6) und Transformator Kern (9), so daß der Kurzschlußstrom begrenzt wird.

Fig. 3 zeigt einen nicht maßstabsgerechten Querschnitt durch einen Hochtemperatursupraleiter (6), wie er in den Kurzschlußstrombegrenzern gemäß den Fig. 1 und 2 verwendet werden kann.

Auf einen rotationssymmetrischen Hohlzylinder (SL) mit einem mittleren Durchmesser (d_{SL}) von 20 cm, einer Höhe (h) von 10 cm und einer Wandstärke von 3 mm aus einem Hochtemperatursupraleiter ist auf der Außenfläche umfänglich die 1. Metallschicht bzw. Silberschicht (E1) von 1 μ m Dicke aus einer Leitsilberpaste aufgebracht. Der mittlere Durchmesser (d_{E1}) dieser Silberschicht (E1) ist praktisch gleich dem Außendurchmesser des Hochtemperatursupraleiters (SL). Auf diese Silberschicht (E1) kann als elektrische Armierung einlagig eine 10 μ m dicke 2. Metallschicht (E2) oder Folie aus Silber oder Aluminium oder eine 100 μ m dicke 2. Metallschicht oder Folie aus Blei oder Antimon oder Indium oder Wismut oder Stahl oder Zinn oder Zink oder aus einer Legierung dieser Metalle aufgebracht werden. Diese wurde mit einem elastischen Stahldraht mit 1000 Windungen und einem Querschnitt von 0,03 mm² bzw. mit der auf Zugspannung ausgelegten elastischen Armierung (7) umwickelt, die mittels eines Lotes oder eines kältebeständigen Kunstharzes oder eines glasfaserverstärkten Epoxidharzes bzw. des Fixiermittels (8) auf der 2. Metallschicht (E2) fixiert ist. Mit (12) ist die Achse des Hohlzylinders (SL) bezeichnet. Die 2. Metallschicht

(E2) könnte auch fehlen, wie in Fig. 1.

Zusätzlich oder alternativ können die Silberschicht (E1) und/oder die 2. Metallschicht (E2) auf der Innenfläche des Hochtemperatursupraleiters (SL) angebracht sein. Die entsprechenden Schichten sind hier mit einem Apostroph versehen. In diesem Fall ist es zweckmäßig eine auf Druck ausgelegte Armierung (7) im Innenraum des Hochtemperatursupraleiters (SL) erforderlich (nicht dargestellt), um die Silberschicht (E1') und ggf. auch die 2. Metallschicht (E2') an den Hochtemperatursupraleiter (SL) anzudrücken und einen Übergangs- bzw. Kontaktwiderstand von < 1 m Ω cm zu gewährleisten.

Die mechanische Außenarmierung (7) hält den Hohlzylinder (SL) unter kompressivem Druck. Bei oder oberhalb von Zimmertemperatur bewickelt man den beschichteten Hohlzylinder (SL) mit einem Stahldraht (7), der während der Bewicklung unter einer annähernd konstanten Zugspannung (σ_{BW}) steht. Das Bewickeln erfolgt mit einer Wickelmaschine, wie sie zur Herstellung von Kuperspulen verwendet wird. Nach der Bewicklung werden die einzelnen Windungen fixiert, was durch ein Verlöten oder durch ein Verkleben mittels eines kältebeständigen Kunstharzes geschehen kann.

Um die gewünschte Wirkung, d. h. die Erzeugung eines kompressiven Druckes im Hochtemperatursupraleitermaterial sowohl bei Zimmertemperatur als auch unterhalb von 100 K sicherzustellen, müssen folgende Forderungen erfüllt sein:

- a) Die Zugspannung (σ_{BW}), unter welcher die Armierung (7) auf den beschichteten Hohlzylinder (SL) gewickelt wird, muß so gewählt werden, daß dessen Elastizitätsbereich nicht überschritten wird.
- b) Damit der kompressive Druck ($-\sigma_{SL}$) im Hochtemperatursupraleiter beim Abkühlen des Hohlzylinders (SL) erhalten bleibt oder besser noch vergrößert wird, ist eine Armierung (7) zu bevorzugen, deren thermischer Ausdehnungskoeffizient (α_A) größer ist als der thermische Ausdehnungskoeffizient (α_{SL}) des Materials des Hohlzylinders (SL).
- c) Gleichzeitig darf die Differenz zwischen den beiden thermischen Ausdehnungskoeffizienten ($\alpha_A - \alpha_{SL}$) nicht so groß sein, daß die Armierungs-Zugspannung (σ_A) in der fixierten Armierung (7) beim Abkühlen ihren Elastizitätsbereich überschreitet.

Zur quantitativen Berechnung der Zugspannung (σ_{SL}) in der Armierung (7) sowie des kompressiven Druckes ($-\sigma_{SL}$) im Hochtemperatursupraleiter kann wie folgt vorgegangen werden: Bei jeder Temperatur (T) gilt:

$$-\sigma_{SL} = K \cdot \sigma_A \quad (1)$$

mit: $K = n \cdot S_A / S_{SL}$

n = Anzahl Windungen des Drahtes (7), S_A = Querschnittsfläche des Drahtes (7),

S_{SL} = Wand-Querschnittsfläche des Hohlzylinders (SL).

Bei einer Temperatur der Bewicklung (T_{BW}) ist der kompressive Druck gegeben durch:

$$-\sigma_{SL}(T_{BW}) = K \cdot \sigma_{BW} \quad (2)$$

Unter Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit von α und E gilt für Temperaturen T ungleich T_{BW} :

$$\alpha_A(T_{BW} - T) + [\sigma_A(T_{BW}) - \sigma_A(T)]/EA = \alpha_{SL}(T_{BW} -$$

$$T) + [\alpha_{SL}(T_{BW}) - \alpha_{SL}(T)]/E_{SL} \quad (3)$$

mit: E_A = Elastizitätsmodul der Armierung (7) und
 E_{SL} = Elastizitätsmodul des Hochtemperatursupraleiters.

Einsetzen von Gleichung (1) und (2) in Gleichung (3) ergibt:

$$-\sigma_{SL}(T) = \sigma_{BW}/K + K^{-1} \cdot (\alpha_A - \alpha_{SL}) \cdot (T_{BW} - T)/[K/E_{SL} + 1/E_A]$$

und

$$\sigma_A(T) = \sigma_{BW} + (\alpha_A - \alpha_{SL}) \cdot (T_{BW} - T)/[K/E_{SL} + 1/E_A]$$

Beispiel

Der supraleitende Hohlzylinder (SL) hatte einen Radius von 10 cm, eine Höhe von 10 cm, einen Wandquerschnitt S_{SL} von 30 mm², einen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_{SL} = 10 \cdot 10^{-6}$ und einen Elastizitätsmodul $E_{SL} = 29$ GPa.

Der Stahldraht (7) hatte $n = 1000$ Windungen, einen Querschnitt S_A von 0,03 mm², einen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_A = 15 \cdot 10^{-6}$, einen Elastizitätsmodul $E_A = 200$ GPa und eine Zugspannung $\sigma_{BW} = 120$ MPa. Die Elastizitätsgrenze betrug 700 MPa.

Vorzugsweise gilt für den Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_A: 5 \cdot 10^{-6} \leq \alpha_A \leq 25 \cdot 10^{-6}$ und für die Zugspannung $\sigma_{BW}: 10 \text{ MPa} \leq \sigma_{BW} \leq 500 \text{ MPa}$.

Als Fixiermittel (8) wurde ein unter dem Handelsnamen Deltabond erhältlicher Kunststoff verwendet. Beim Abkühlen auf 77 K traten keine Rißbildungen auf.

Durch die elektrische Armierung (E1, E2) und die mechanische Armierung (7) wird der Strom an lokal entstandenen Spannungsüberhöhungen vorbei kommutiert. Die im Hochtemperatursupraleiter (6) dissipierte elektrische Leistung wird dadurch reduziert und ein lokale Überhitzung vermieden. Die elektrische Armierung kann aus einer oder aus mehreren metallischen Schichten aufgebaut sein, innen und/oder außen am Hochtemperatursupraleiter (SL). Diese Schichten können als Folien aufgepreßt oder auch galvanisch oder durch Plasmaspritzen oder ähnliche Verfahren aufgebracht werden.

Damit der Strom an jeder Stelle kommutiert werden kann, muß der Kontaktwiderstand zwischen der elektrischen Armierung (E1, E2) und dem Hochtemperatursupraleiter (SL) überall möglichst klein sein, vorzugsweise $< 1 \text{ m}\Omega \text{ cm}$, insbesondere $\leq 1 \mu\Omega \text{ cm}$.

Damit der Hochtemperatursupraleiter (SL) nennenswert entlastet wird, muß der elektrische Widerstand der elektrischen Armierung (E1, E2) kleiner sein als der Widerstand des über die kritische Temperatur (T_c) erwärmten Supraleiters. Für eine einfache, auf die Oberfläche des Hochtemperatursupraleiters (SL) aufgetragene Armierungsschicht der Dicke (δ_{E1}) bedeutet diese Forderung:

$$\delta_{E1}/\rho_{E1} > \delta_{SL}/\rho_{SL} \quad (4)$$

mit ρ_{E1} = spezifischer Widerstand der 1. Metallschicht (E1) bei Zimmertemperatur, ρ_{SL} = spezifischer Widerstand des Hochtemperatursupraleiters (SL) bei Zimmertemperatur und δ_{SL} = Dicke bzw. Wandstärke des Hochtemperatursupraleiters. Allgemein gilt für m_1 Schichten:

$$\sum \delta_{Em}/\rho_{Em} > \delta_{SL}/\rho_{SL} \quad (5)$$

wobei über m von 1 bis m_1 summiert wird.

Für Strombegrenzeranwendungen muß der Widerstand der Armierung (E1, E2, 7) groß genug sein, um die gewünschte Strombegrenzung zu erreichen. Im Falle eines Kurzschlusses (11), wenn also die volle Nennspannung (U_N) am Strombegrenzer abfällt, soll der Fehlstrom auf typischerweise das k -fache des Nennstromes (I_N) begrenzt werden, mit $1 \leq k \leq 10$, vorzugsweise mit $2 \leq k \leq 5$.

Für einen resistiven Strombegrenzer (Hochtemperatursupraleiter direkt in Reihe mit der zu schützenden Leitung), der vorzugsweise meanderförmig ausgebildet ist, heißt das: der Widerstand der elektrischen Armierung sollte größer sein als $U_N/(k \cdot I_N)$. Dieser meanderförmige Widerstand ist auf einer elektrisch nichtleitenden Platte, die als mechanische Armierung wirkt, befestigt (nicht dargestellt).

Im Falle eines induktiven Strombegrenzers gemäß den Fig. 1 und 2 wird die zu schützende Leitung induktiv über eine normal leitende Spule mit n Windungen an einen supraleitenden Hochtemperatursupraleiter gekoppelt. Ein Leitungsstrom (I) und eine an der normalleitenden Drosselspule (3) abfallende Spannung (U) werden dabei mit einem Faktor n (beim Strom) bzw. $1/n$ (bei der Spannung) in den supraleitenden Hohlzylinder (6) transformiert. Für den elektrischen Widerstand (R) der Armierung (E1, E2, 7) des Hochtemperatursupraleiters (6) ergibt sich daher:

$$R > U_N/(n^2 \cdot k \cdot I_N) \quad (6)$$

oder, falls die elektrische Armierung (E1, 7) aus einer einfachen Schicht der Dicke (δ_{E1}) besteht und die Höhe (h) hat:

$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot \rho_{E1} \cdot h/\delta_{E1} > U_N/(n^2 \cdot k \cdot I_N) \quad (7)$$

mit einem Faktor k , für den gilt: $1 \leq k \leq 10$, vorzugsweise $2 \leq k \leq 5$.

Die thermische Masse der Armierung sollte möglichst groß gewählt werden, um thermische Schäden in der Armierung (E1, E2, 7) zu verhindern. Bei der vorliegenden Ausführung ist die mechanische Armierung (7) Teil der elektrischen Stabilisierung. Der Stahldraht (7) wirkt als zusätzlicher elektrischer Bypass. Der Kurzschlußstrom wird an Spannungsüberhöhungen zunächst in die Silberschicht (E1) bzw. in die 2. Metallschicht (E2) und dann zum Teil weiter in den Stahldraht (7) kommutieren. Andererseits führt der durch den Stahldraht (7) erzeugte Druck zu einer Verminderung des Kontaktwiderstandes zwischen den verschiedenen Schichten (E1, E2).

Der Hochtemperatursupraleiter (6) wurde für 0,1 s mit dem 4fachen Wert des kritischen Stromes belastet. Im Unterschied zu einem nur mechanisch mittels der Armierung (7) stabilisierten Hochtemperatursupraleiter (6), welcher unter dieser Belastung zerstört wurde, traten an den zusätzlich elektrisch stabilisierten Ringen keine Schäden auf.

Es versteht sich, daß andere als die genannten Abmessungen und Metallschichten verwandt werden können. Wichtig ist, daß zusätzlich zu einer mechanischen Armierung (7) noch mindestens eine elektrische (E1, E2) vorgesehen ist, die als elektrischer Bypass wirkt.

Der spezifische Widerstand der metallischen Leiter (E1, E2; E1', E2') sollte vorzugsweise $> 1 \mu\Omega \text{ cm}$ bei 77 K sein.

Bezugszeichenliste

- 1 Wechselspannungsquelle
 2 Öffner, Schalter
 3 Drosselspule
 4 Kühler
 5 Vakuumgefäß von 4
 6 Hohlzylinder Hochtemperatursupraleiter, Hohlzylinderstapel
 7 Armierung, Draht, Band, Faser, Glasfasergewebe
 8 Fixiermittel, Lot, Kunstharz, Glasfasergewebe
 9 Kern aus weichmagnetischem Werkstoff, Transformator-kern
 10 Stromverbraucher, Last
 11 Kurzschluß
 12 Achse von 6
 d_{SL} mittlerer Durchmesser von SL
 d_{E1} mittlerer Durchmesser von E1
 E1, E1' Silberschicht
 E2, E2' Silber-, Aluminiumschicht bzw. -folie
 h Höhe von 6
 N₂ Stickstoff
 SL Hochtemperatursupraleiter, Formkörper von 6
 S2 Abschaltsignal für 2

Patentansprüche

1. Hochtemperatursupraleiter (6), mit mindestens einem metallischen Leiter (E1, E2; E1', E2') auf mindestens einer Leiterfläche eines Formkörpers (SL) des Hochtemperatursupraleiters (6) und in gutem elektrischem Kontakt zu diesem, dadurch gekennzeichnet, daß der mindestens eine metallische Leiter (E1, E2; E1', E2') in Form einer oder mehrerer Schichten oder Folien aufgebracht ist, für welche gilt:

$$\Sigma \delta_{Em}/\rho_{Em} > \delta_{SL}/\rho_{SL}$$

wobei über m von 1 bis m1 summiert wird mit m1 = Anzahl der Schichten (E1, E2; E1', E2'), ρ_{Em} = spezifischer Widerstand einer m. Metallschicht (Em) bei Zimmertemperatur, ρ_{SL} = spezifischer Widerstand des Formkörpers (SL) bei Zimmertemperatur, δ_{Em} = Dicke bzw. Wandstärke der m. Metallschicht und δ_{SL} = Dicke bzw. Wandstärke des Formkörpers (SL) des Hochtemperatursupraleiters (6).

2. Hochtemperatursupraleiter (6) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

- a) daß der Formkörper (SL) des Hochtemperatursupraleiters (6) ein Hohlzylinder ist und
 b) daß zum Andrücken des mindestens einen elektrischen Leiters (E1, E2; E1', E2') an den Hohlzylinder (SL) mindestens eine elastische Armierung (7) vorgesehen ist.

3. Hochtemperatursupraleiter (6) nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet,

- a) daß die Armierung (7) aus Draht oder Band oder Glasfasergewebe besteht und
 b) daß der thermische Ausdehnungskoeffizient (α_A) der Armierung (7) größer als derjenige des Materials des Hohlzylinders (SL) ist.

4. Hochtemperatursupraleiter (6) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der elektrische Kontaktwiderstand des zwischen dem mindestens einen elektrischen Leiter (E1, E2; E1', E2') und dem Formkörper (SL) des

Hochtemperatursupraleiters (6) $< 1 \text{ m}\Omega \text{ cm}$ ist.

5. Hochtemperatursupraleiter (6) nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der thermische Ausdehnungskoeffizient α_A der Armierung (7) größer als derjenige des Materials des Hohlzylinders (SL) ist.

6. Hochtemperatursupraleiter (6) nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß $5 \cdot 10^{-6} \leq \alpha_A \leq 25 \cdot 10^{-6}$ ist.

7. Hochtemperatursupraleiter (6) nach einem der Ansprüche 2 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Differenz zwischen dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten (α_A) der Armierung (7) und dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten (α_{SL}) des Hochtemperatursupraleiters nicht so groß ist, daß die Armierung (7) bei einem Abkühlen ihren Elastizitätsbereich überschreitet.

8. Hochtemperatursupraleiter (6) nach einem der Ansprüche 2 bis 7, dadurch gekennzeichnet,

- a) daß die Armierung (7) mit einem Fixiermittel (8) fixiert ist, derart, daß der Hohlzylinder (SL) bei allen Gebrauchstemperaturen unter kompressivem Druck ($-\rho_{SL}$) steht,
 b) insbesondere, daß das Fixiermittel (8) ein Lot oder ein kaltebeständiges Kunstharz oder ein glasfaserverstärktes Epoxidharz ist.

9. Hochtemperatursupraleiter (6) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,

- a) daß der mindestens eine metallische Leiter (E1, E2; E1', E2') einen spezifischen Widerstand von $> 1 \mu\Omega \text{ cm}$ bei 77 K aufweist,
 b) insbesondere, daß der metallische Leiter Blei oder Antimon oder Indium oder Wismut oder Stahl oder Zinn oder Zink oder Legierungen dieser Metalle enthält und
 c) als Folie angepreßt oder
 d) durch Plasmaspritzen oder Flammenspritzen oder
 e) durch ein galvanisches Verfahren aufgebracht ist.

10. Verwendung eines Hochtemperatursupraleiters (6) nach Anspruch 1 zur Strombegrenzung in einer Strombegrenzerschaltung, insbesondere mit einer Drosselspule (3) als strombegrenzendem Bauelement, wobei für den elektrischen Widerstand (R) der gesamten elektrischen und mechanischen Armierung (E1, E2; E1', E2', 7) des Hochtemperatursupraleiters (6) gilt:

$$R > U_N/(n^2 \cdot k \cdot I_N)$$

mit U_N = Nennspannung, I_N = Nennstrom, n = Zahl der Windungen der Drosselspule (3), k = Faktor mit $1 \leq k \leq 10$.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

FIG. 1

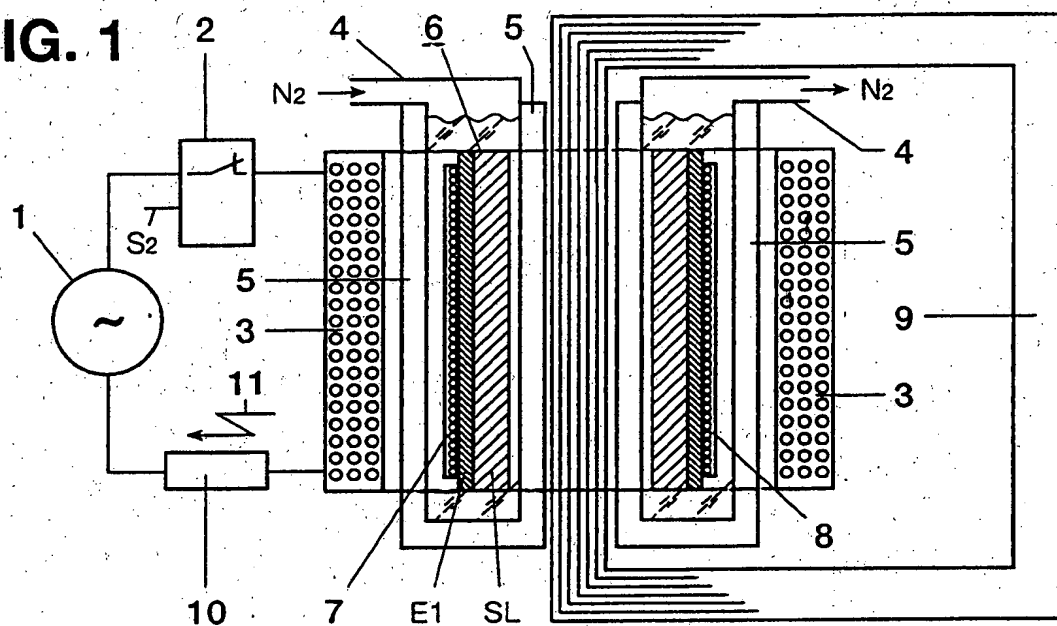


FIG. 2

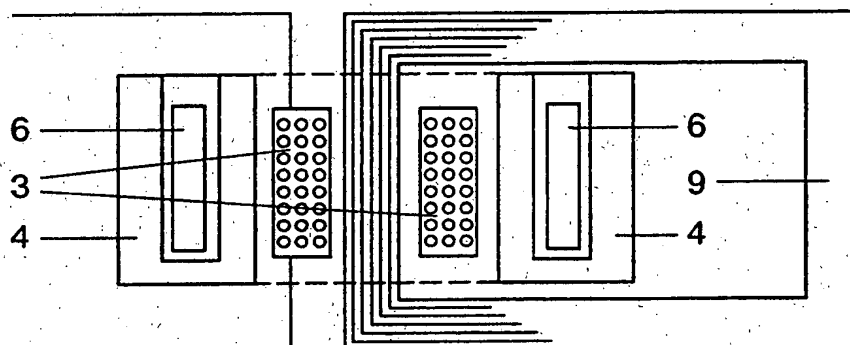


FIG. 3

